物理学実験第一

実験手順書の補足と訂正

第IV章 放射線計測
実験１・２ 放射線の観測



基礎物理学専攻 柴田研究室 中野健一

平成 26 年 5 月 19 日

概 要

本冊子では、実験手順書に掲載し切れなかった詳細を説明する。実験・レポート執筆の際には本冊子を参考にすること。本冊子を含む参考資料をレポート提出の際に必ず返却すること。

目 次

1 始めに

1.1 実験中の留意点

本テーマの主旨は、幾つかの方法で放射線を可視化してその振る舞いを実感してもらう事である。現代の物理学実験では、肉眼で現象を観察する事は稀であり、殆どの検出装置は電気的な信号を電子データとして保存する。その様な測定は他テーマで行なう。従って本テーマの実験は現象の観察が主になる。現象全体をただ眺めて終わるのでなく、その特徴を個々に切り分けて認識し、客観的・定量的な観察を心がけること。

放射性物質 (密封線源) を取扱うので下記の事柄に留意すること:

- 線源を保管庫から取り出す時は線源使用記録簿に記入する
- 線源の密閉を破損しない様に丁寧に扱う
- 実験室で飲食しない (手を経由して放射性物質を取り込む恐れ有り)
- 線源の遮蔽を怠らない... 人に向けない。使わない時はケースに入れる
- 実験終了時には線源を保管庫に返したか再確認する

1.2 実験の日程

- 実験 1 日目
  1. 実験手順の説明
  2. ポケットチェンバーによる放射線モニタ
  3. [実験 1] シンチレーション光の観察
  4. [実験 2] 霧箱での放射線観測
- 実験 2 日目
  1. ディスカッション
  2. ポケットチェンバーによる放射線モニタ
  3. 実験 1 & 2 の続き
  4. [実験 2.5] サーベイメータを用いた環境放射能測定

実験 1 と 2.5 には装置が 1 グループ分しか無いので、グループで交代しながら実験する。それ以外の時間で実験 2 を進める。

1.3 参考資料

次の参考資料を配布する。全て自宅に持ち帰っても良いが、レポート提出時に忘れず返却する事。

1. 本資料『実験手順書の補足と訂正』
2. 書籍『放射線計測の理論と演習』のコピー
3. 参考資料『拡散霧箱による放射線飛跡の観察』(JAEA)
4. 霧箱、個人線量計、サーベイメータの取扱説明書

本資料の PDF 版及びその他の資料を http://www.nucl.phys.titech.ac.jp/kiribako/ で公開している。学外からもアクセスできる。

1.4 個人線量計による放射線モニタ

一人一個ずつの個人線量計 (ポケットチェンバー) が用意されている。ポケットチェンバーの利用方法を学び、実際の被曝量を測定・議論する為に、実験の両日ともに個人線量計を身に付けて被曝量を測定する。本テーマで用いる放射線源はテスト用なので微弱であり、適切に用いる限りはどれだけ実験が長引いても健康を害する様な被曝は起きない。ポケットチェンバーを用いる際は以下の点に注意する:

- 実験 1 日目の最初に線量値をリセットし、シリアルナンバーを実験ノートに記録しておく。2 日目も同一のポケットチェンバーを用いる。
- 正しく装着する (体のどの部位にどういう向きで)。
- 各実験日の最後に線量値を確認し、各日での被曝量を記録する。
- 実は 1 個だけ計測精度の良い (0.01 μSv 単位) ポケットチェンバーが有る。全学生は実験 2 日目の最後にその高精度の計測値を記録する。レポートで被曝量を議論する際はその値を使う。

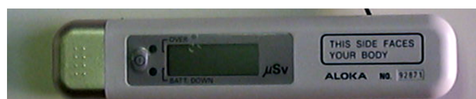
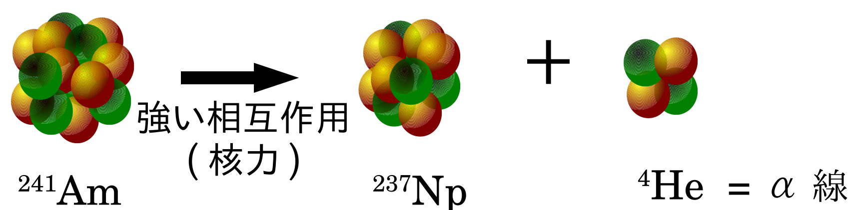


図 1: 本テーマで使用するポケットチェンバー (個人線量計)。

2 基本原理

2.1 放射性崩壊



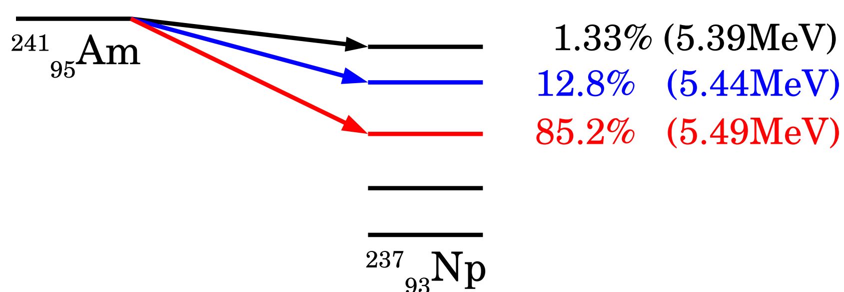


図 2: α 崩壊。

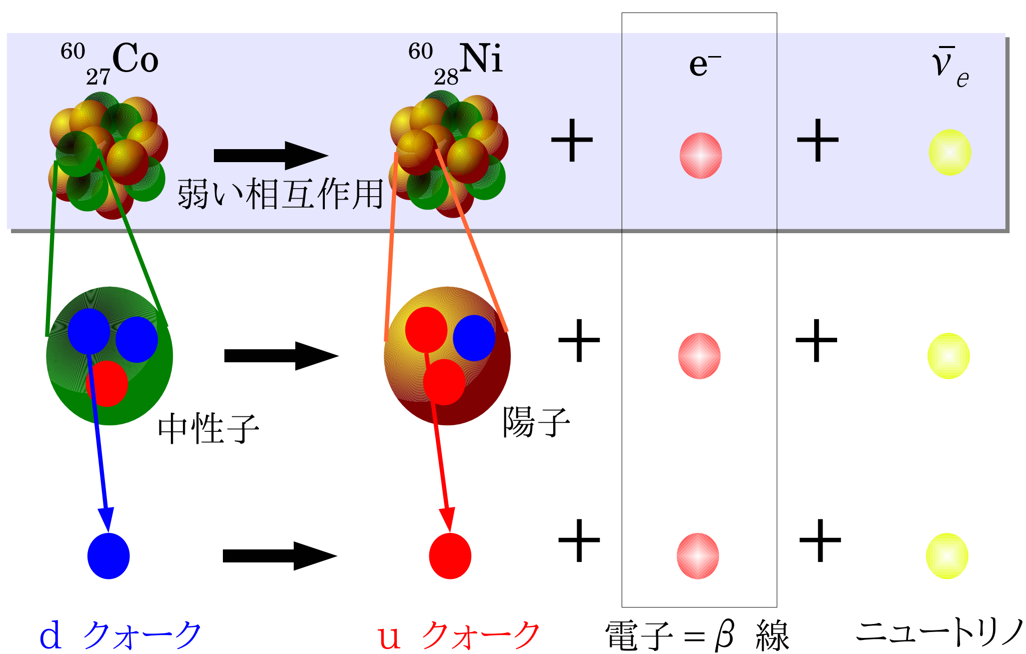


図 3: β 崩壊。

α 線と β 線のエネルギースペクトル (図 4 参照) には重要な違いが有る。違いが生じる理由を確認すると共に、違いを念頭に置いて観察を行なうこと。

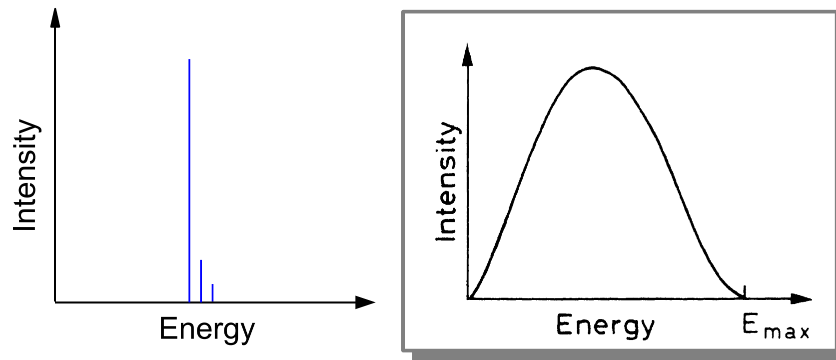


図 4: α 線と β 線のエネルギースペクトルの模式図。

2.2 放射線と物質との相互作用

放射線が物質を通過する際には次の様な相互作用が起こり得る。但しそれぞれの発生頻度 (確率) には大きな違いが有り、実質は無視できる作用も有る。

- 電子及び原子核とのクーロン相互作用
  - 原子 ($\sim 10^{-10}$ m)、原子核 ($\sim 10^{-14}$ m)、電子のどれが主要な作用相手か?
  - 相互作用 (散乱) によって何が起こるか (電離, 励起, etc)?
- 電磁放射線の放出 (bremsstrahlung, breaking radiation)
  - 荷電粒子が加速・減速する際に放出する電磁放射線
  - 放射強度 (確率) $I \sim z^2 Z^2 / M^2$ ... α 粒子と β 粒子でどれだけ違うか?
- 原子核との強い相互作用
  ... 放射線のエネルギーがクーロン障壁を越える場合には重要
- チェレンコフ光の放出
  ... 放射線の速度が物質中での光速を越える場合に放出される (光の衝撃波)

2.3 飛程

放射線は、物質と多数回の散乱を起こして運動エネルギーを少しずつ失っていく。飛程とは、全ての運動エネルギーを失って停止するまでの距離である。但し放射線の種類によって停止の様子が異なるので、飛程の定義は同一ではない。詳細は参考文献を参照せよ。

2.3.1 α 粒子の飛程

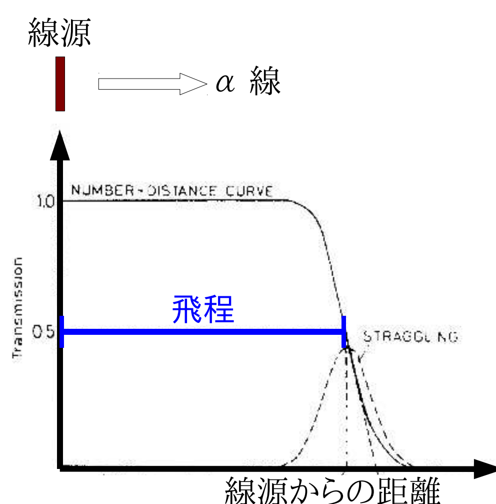


図 5: α 線の飛程。Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments (W. R. Leo, ISBN 3-540-57280-5) より抜粋。

運動エネルギー T (MeV) での空気中での飛程 R (mm) について以下の半経験式が得られている:

$$R = \exp(1.61\sqrt{T}) \quad \text{for} \quad 1 < T < 4 \text{ MeV} \tag{1}$$

$$R = (0.05T + 2.85)T^{3/2} \quad \text{for} \quad 4 < T < 15 \text{ MeV} \tag{2}$$

又、参考文献にはシリコン中での飛程がグラフで与えられている。更に Bragg-Kleeman 則

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}\sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \tag{3}$$

を用いれば、物質 1 での飛程 R_1 が分かると物質 2 での飛程 R_2 が計算できる。比重 ρ_i と原子量 A_i に関して、表 1 と実験室壁面の周期表を参考にすること。

Bragg-Kleeman 則の A_i は物質 i の原子量であるが、物質 i が化合物や混合物である場合は実効的な分子量を用いる。参考資料 2 (書籍『放射線計測の理論と演習』) の式 (4.14) で示されている通り、

$$\frac{1}{\sqrt{A_{\text{eff}}}} = \sum_i \frac{\omega_i}{\sqrt{A_i}}$$

である。ここで ω_i は重量の比である事に注意 (体積や原子数の比ではない)。

2.3.2 β 粒子の飛程

参考文献を参照せよ。

表 1: 幾つかの物質の性質

物質	比重 ρ (g/cm^3)	原子量 A ^{*1}
空気	1.3×10^{-3}	14.74
水	1.0	DIY
ポリエチレン, CH_2CH_2	0.9	DIY
ポリ塩化ビニル, CH_2CHCl	1.4	DIY
ポリ塩化ビニリデン, CH_2CCl_2	1.6	DIY
石英ガラス, SiO_2 ^{*2}	2.2	DIY
アルミ	2.7	27
鉛	11.3	207

DIY = Do It Yourself。参考資料 2 を参照

$*1$ 化合物や混合物では実効値 A_{eff} を使う

$*2$ 微量成分を無視して SiO_2 のみと仮定して良い

3 実験 1 — ZnS を用いたシンチレーション光の観察

ZnS (硫化亜鉛) シンチレータと ^{241}Am 線源を使用し、α 線の入射により ZnS が発光する様子を観察する。

3.1 装置

3.1.1 円盤状 ^{241}Am 線源

- 線源 (図 6) は鉛容器 (図 7) に収められている
- 線源保管庫から鉛容器ごと取り出す。
- 使用時以外は線源を鉛容器から出さない。
- 四角の蒸着面から α 線が放射される。その面には触らないこと。円盤はただのアルミである。

3.1.2 ZnS シンチレータ

- 図 8 参照。ZnS は上板の内側に塗布されている。



図 6: 円盤状 ^{241}Am 線源


図 7: 鉛容器


図 8: 距離調節台付き ZnS シンチレータ

3.2 手順

線源とシンチレータは 1 セットのみ用意されているのでグループ毎に交代で観察を行なう。各グループへの時間配分は 1 日目と 2 日目に 50 分ずつとする。

1. 空気中での α 線の飛程を計算する (課題 1-2)。計算結果を TA に見せて間違いでない事を確認する。

2. 実験室奥の暗室に装置とログノートを持ち込む。シンチレーション光は微弱なので観察中はなるべく暗室内を暗くする。

3. [観察 1] ZnS が塗布されている面側に線源を近づけ (α 線を照射し)、反対側からシンチレータが発光する事を確認する。

4. [観察 2] 緑の台の高さを調節して線源を ZnS に密着させる。徐々に線源を離していき、シンチレーション光がどのように変化するか観察する。

5. 下記の物質の中での α 線の飛程を計算する。

   - サランラップ
   - アルミ箔

   共に典型的な厚さは 10 μm である。参考資料 2 (書籍『放射線計測の理論と演習』) の例題 4.5 に書いてある通り、空気の実効分子量 A_{eff} は 14.74 であるが、これの算出に使われた数値 (22.9% O 等) の意味を確認しておく。正しく理解しておけば、サランラップの A_{eff} も同様に計算できる。

6. [観察 3] 線源と ZnS の間に上記の物質を置いてシンチレーション光を観察する。この観察の主目的は、シンチレーション光が見えなくなる距離 (観測結果) と物質中の α 線の飛程 (計算予想値) を比較する事である。比較に適したセットアップ (条件) を観察前/中に良く考える。

4 実験 2 — 霧箱による放射線の飛跡の観察

霧箱を用いて放射線の飛跡を観察する。

4.1 可視化検出器の歴史



図 9: ウィルソン型霧箱。放射線電離作用で生じたイオンが霧の核になる。1927 年ノーベル物理学賞。



図 10: 泡箱 (Glaser, 1952)。過飽和の液体ヘリウムや液体水素が充填される。イオンが泡の核になる。



図 11: スパークチェンバー (福井・宮本, 1957)。イオンが電極間の放電を引き起こす。

4.2 装置

4.2.1 放射線源

図 12 参照。必要になったら線源保管庫から借り出す。金属ブロックは放射線防護用のカバーであり、線源を霧箱に取り付ける場合のみ外す。金属ブロックに差し込まれている棒の先端に放射線源が付いている。棒全体はただの支持体である。



図 12: ^{241}Am (α 線源) と ^{147}Pm (β 線源)

4.2.2 霧箱

図 13 参照。別に用意された資料を読んでこの装置の動作原理と使用方法を理解しておくこと。特に参考資料「拡散霧箱による放射線飛跡の観察」の「付録 (最後の 4 ページ)」は、装置を調整して飛跡を明瞭にする際に役立つ。



図 13: 島津理化製の高温拡散型霧箱 (WH-20)

4.3 手順

4.3.1 1 日目

1. 装置に入っている液体はエチレングリコールと水を約 2:1 で混ぜたものである。既に適切な量が入っているが、不足している場合は TA が追加する。

2. 参考資料 3 の 1-3 章を読み、装置の動作原理を理解する。

3. 参考資料 4 を読み、装置の操作方法を理解する。特に、2 個の黒いつまみ (ヒータ電力コントロールつまみとサーモスタットつまみ) で装置内部の温度をどの様に調整できるかが重要である (図 14 参照)。

4. 装置の電源を入れる。霧が発生する (放射線が観察できる) 様になるまでに少なくとも 20 分はかかる。これを待つ間に、実験課題を読んで観察すべき項目を考えておく。

5. 霧箱用 ^{241}Am 線源を取り付ける。

   - 飛跡が見えない場合は、参考資料 3 の付録 IV などを参考にしながら装置を調整する。
   - 飛跡が見えた場合は、その状態を TA に確認して貰う。飛跡が明瞭でないならば装置を調整する。
   - 飛跡が見えていたのに時間の経過につれて見えにくくなる場合は、エチレングリコールの水滴が放射線源の先に付着している事が先ず考えられる。水滴が大きいと α 線・β 線ともに止まってしまうので飛跡は見えなくなる。線源を霧箱から取り外し、片手にキムワイプを持ち、線源の先端でキムワイプを数回叩く様にして詰っている水滴を取り除く。

6. [観察 1] ^{241}Am 線源から出る α 線の飛跡を観察する。

7. [観察 2] 霧箱用 ^{147}Pm 線源を取り付けて β 線の飛跡を観察する。

8. [観察 3] 線源が無い状態で霧箱内に生じる飛跡を観察する。^{147}Pm 線源からの β 線が観測できる状態に霧箱をしてから、この観察を行なうこと。

9. [観察 4] シンチレーション光の観察に使用した円盤状 ^{241}Am 線源を霧箱に近づけて、霧箱内の変化を観察する。この線源をエチレングリコールの蒸気に触れさせたくないので、棒状線源の差込穴には近づけないこと。

4.3.2 2 日目

磁場中での放射線の飛跡を観察する。利用する磁石は強力であるから、金属部分・精密機器・磁気カード等に注意を払って実験すること。またこの磁石 (ネオジウム磁石) は熱に弱いので、霧箱の高温部分に接触させないこと。

1. 霧箱の電源を入れて設定温度等を調整し、α 線と β 線の飛跡が観察できる状態にする。
2. 磁石を霧箱中央に置く。飛跡が見やすくなる様に磁石の片面には黒い布が貼ってあるので、その面を上にする。
3. 磁石とその周辺が暖まるまで暫く (5–10 分) 待つ。
4. [観察 5] α 線源と β 線源を順次挿入し、磁石上部での飛跡の振る舞いを観察する。

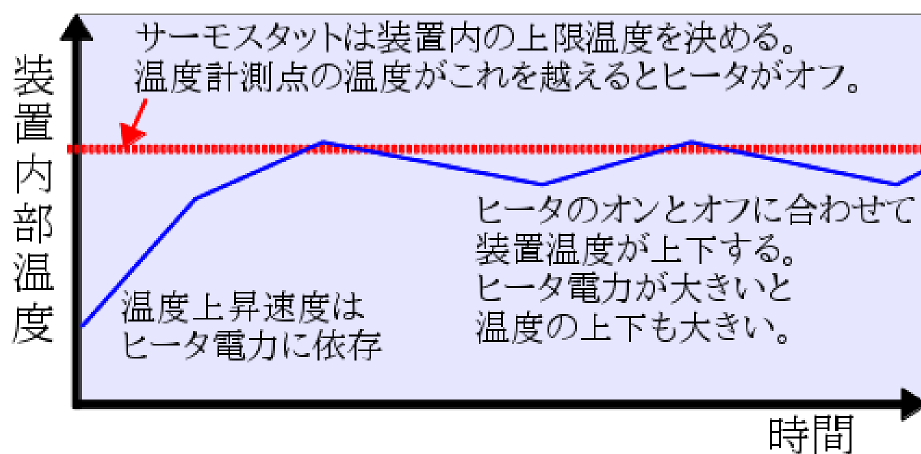


図 14: 霧箱装置の内部温度変化の様子。

5　実験 2.5 — サーベイメータによる環境放射能の測定

サーベイメータを用いて、実験室及びその周辺の環境放射能を測定する。装置は 1 台のみ用意されているのでグループ毎に交代で観察を行なう。

5.1　装置

サーベイメータと記録用紙。このサーベイメータは検出した γ 線の強度を線量当量率として表示する。使用方法は担当教員か TA が口頭で説明するが、説明書も読んでから測定を行なうこと。



図 15: サーベイメータ。

5.2　手順

1. 記録用紙に測定開始の日時等を記入する。
2. 放射線源を近づけてサーベイメータの反応を確かめると良い。
3. 記録用紙で指定されている測定場所に行き、各地点で測定を行なう。
4. 特に線源保管庫 (B54 & B55) の周辺を測定する時には、保管庫の扉を開けた状態と閉めた状態で測定を行なう。
5. 10 分程度で戻ってこられる範囲ならば指定場所以外で測定してみても良い。
6. 記入済みの記録用紙を TA に渡し、そのコピーを受け取る。レポートにはコピーを添付すること。

2010 年度までの廊下および中庭での測定値は約 0.08 μSv/hour であった。2011 年 3 月 11 日に福島第一原子力発電所の事故が起こり、その後の 2011 年前期の測定値は 0.12 μSv/hour になった。参考までに表 2 は東工大 大岡山地区・すずかけ台地区で 2011 年 3-4 月に測定された放射線量測定データである。

表 2: 東京工業大学 安全総合管理センター 環境保全室による大岡山地区・すずかけ台地区での放射線量測定データ。(http://www.envpro.titech.ac.jp/)。

	大岡山地区 原子炉工学研究所敷地内			すずかけ台地区 アイソトープ総合センター・ドライエリア		
測　定 年 月 日	測　定 時　刻	γ サーベ (μ Sv/h)	平常値 (μ Sv/h)	測　定 時　刻	γ 線モニタリングポスト (μ Sv/h)	平常値 (μ Sv/h)
2011/3/15	10:50	0.78	0.05	最大値/連続測定	0.1	0.05
2011/3/15	14:03	0.11	0.05			
2011/3/16	10:35	0.08	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/3/16	12:15	0.10	0.05			
2011/3/16	13:30	0.08	0.05			
2011/3/16	16:40	0.07	0.05			
2011/3/17	9:05	0.09	0.05	最大値/連続測定	0.05	0.05
2011/3/17	10:25	0.08	0.05			
2011/3/17	16:25	0.08	0.05			
2011/3/18	9:05	0.07	0.05	最大値/連続測定	0.05	0.05
2011/3/18	10:35	0.07	0.05			
2011/3/18	16:05	0.06	0.05			
2011/3/19	8:33	0.07	0.05	最大値/連続測定	0.05	0.05
2011/3/20	8:00	0.07	0.05	最大値/連続測定	0.05	0.05
2011/3/21	8:04	0.08	0.05	最大値/連続測定	0.09	0.05
2011/3/22	9:45	0.19	0.05	最大値/連続測定	0.09	0.05
2011/3/22	17:35	0.19	0.05			
2011/3/23	11:05	0.24	0.05	最大値/連続測定	0.08	0.05
2011/3/23	21:30	0.24	0.05			
2011/3/24	9:35	0.23	0.05	最大値/連続測定	0.08	0.05
2011/3/24	17:25	0.19	0.05	最大値/連続測定	0.07	0.05
2011/3/26	8:34	0.18	0.05	最大値/連続測定	0.07	0.05
2011/3/27	8:15	0.18	0.05	最大値/連続測定	0.07	0.05
2011/3/28	9:50	0.15	0.05	最大値/連続測定	0.07	0.05
2011/3/28	17:50	0.16	0.05			
2011/3/29	9:50	0.13	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/3/29	16:55	0.13	0.05			
2011/3/30	9:35	0.12	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/3/31	9:35	0.14	0.05			
2011/3/31	17:50	0.12	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05

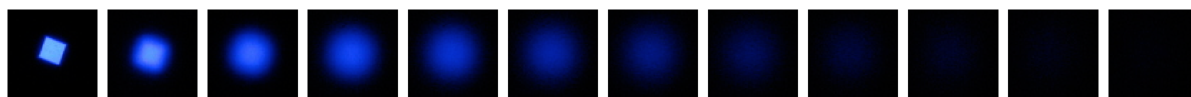
	大岡山地区 原子炉工学研究所敷地内			すずかけ台地区 アイソトープ総合センター・ドライエリア		
測　定 年 月 日	測　定 時　刻	γ サーベ (μ Sv/h)	平常値 (μ Sv/h)	測　定 時　刻	γ 線モニタリングポスト (μ Sv/h)	平常値 (μ Sv/h)
2011/4/1	14:15	0.11	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/4	12:25	0.10	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/5	8:55	0.09	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/6	9:55	0.09	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/7	9:00	0.08	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/8	9:00	0.07	0.05	最大値/連続測定	0.07	0.05
2011/4/11	8:55	0.07	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/12	9:30	0.06	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/13	10:00	0.06	0.05	最大値/連続測定	0.06	0.05
2011/4/14	10:15	0.07	0.05	最大値/連続測定	0.05	0.05

6 ディスカッションとレポート作製の為の情報

6.1 ZnS のシンチレーション光の観察

線源とシンチレータの距離を変えていくと、図 16 の様な変化が観測されたはずである。この変化の特徴を読み取り、α 線の性質と対応させて理解せよ。

又、線源とシンチレータの距離が一定の場合に、幾らかの物質を挿入するとシンチレータが光らなくなったはずである。空気よりも固形物の方が放射線を遮蔽しやすい (阻止能が大きい) と思えばこの結果は当然であるが、これを定量的に検討せよ。



小 $\Longleftarrow$ 線源とシンチレータの距離 $\Longrightarrow$ 大

図 16: 距離ごとのシンチレーション光の様子。

6.2 霧箱による飛跡の観察

図 17 の様な飛跡が観測されたはずである。飛跡の特徴を可能な限り細分化 (長さ, 太さ, 形, etc) して定量的に読み取り、α 線と β 線の性質と対応させて理解せよ。

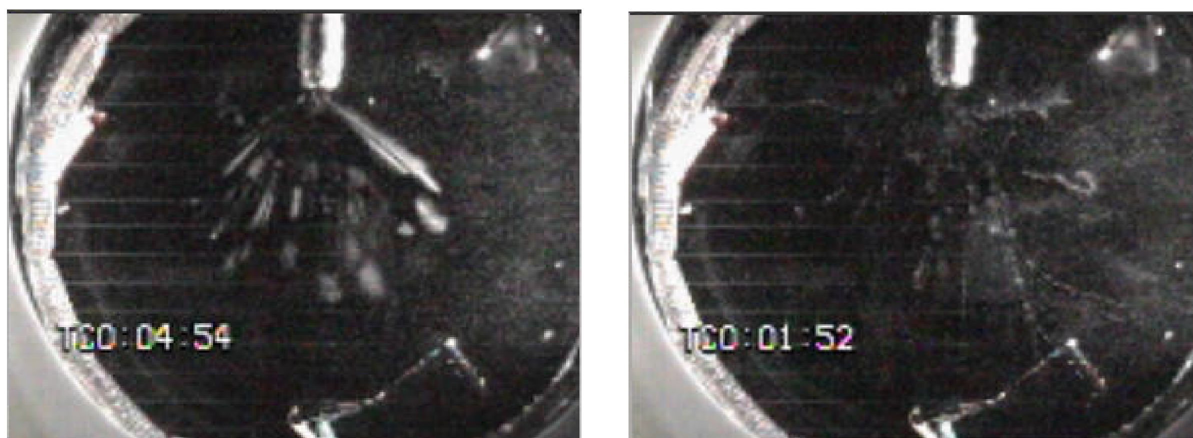


図 17: 霧箱で観測される α 線 (左) と β 線 (右) の飛跡。

6.3 円盤状 ^{241}Am 線源による霧箱中の飛跡

色々と可能性を検討して貰いたいので、他の課題と異なり参考情報を敢えて示していない。尤もらしい現象を推測するだけでなく、観測事実や計算に基づいて様々な仮定を棄却する事も重要である。

6.4 磁場中を運動する荷電粒子の曲率半径

磁場中を荷電粒子が運動すると磁場の影響で軌道が曲がる。粒子の運動量を P (MeV/c)、電荷を Ze、磁場を B (T) とすると、その曲率半径 r (cm) は

$$r = \frac{P}{3ZB} \tag{4}$$

で計算できる。単位に注意すること。

運動量の計算方法に関して。相対論では粒子の運動エネルギー T とその静止質量により全エネルギーが決まる。

$$E = T + Mc^2 \tag{5}$$

静止質量とエネルギーと運動量の関係は

$$M^2c^4 = E^2 - p^2c^2 \tag{6}$$

で与えられる。これを変形すると、運動量は運動エネルギーを用いて

$$pc = \sqrt{T(T + 2Mc^2)} \tag{7}$$

と表される。運動エネルギー T に比べて静止質量 Mc が十分に大きな場合は、この式は非相対論的関係 $p = \sqrt{2MT}$ に帰着する。

α 線の運動は非相対論的に取り扱って良い。概算で質量を 4 GeV/c^2、運動エネルギーを 5 MeV とすると、

$$P = \sqrt{2MT} = 2 \times 10^2 \text{ (MeV/}c\text{)} \tag{8}$$

となる。

この実験で用いた β 線のエネルギーは最大値が約 0.2 MeV である。運動エネルギーが質量 (0.5 MeV/c^2) と同程度になってくると、上記の相対論的式で運動量を計算する必要が生じる。今回の場合では相対論的・非相対論的の 2 通りで計算をしてみるとどうなるか?

6.5 レポートの内容と提出方法

レポートに書くべき内容は一般的な実験レポートの書き方に準ずる。しかし物理学実験第一は実験日程が過密なので、レポートの内容を下記の通り簡略化して良い。この方針は本実験についてのみであり、他の実験についてはその担当教員の指示に従うこと。

- 各実験 (1, 2, 2.5) の目的を認識しておく事は重要なので、レポートに省略せずに書く。結果として実験手順書の文章と同じになったとしても構わない。
- 実験原理は次の 2 点についてのみ簡潔にまとめれば良い。
  - シンチレータが発光する原理
  - 霧箱で飛跡が生じる原理

  その他 (阻止能、飛程、等) の理解度については課題の解答から判断する。
- 実験装置の説明は不要。
- 実験手順の大筋は本書で説明してある通りなので、これをレポートに逐一書く必要は無い。本書に書かれていない事で、重要な (測定結果の再現性に関わる様な) 測定条件、自分が試した事や確かめた事、より効率良く実験を進める工夫等が有れば (箇条書きで) 報告する。
- 測定の結果と考察は当然ながら最重要なので省略せずに書く。
- 実験手順書の課題には全て解答する。「課題の解答」という章か節を作り、そこで全ての課題に言及するという形式が望ましい。レポートの別の箇所で説明している事 (例えば観測結果) については、そこを参照するだけで良い (例えば「4.1 節の説明の通り」と書く)。
- ここで省略可とした項目がレポートに書いてあれば若干は加点する。しかしその比重は小さいので余り追加点を期待しないこと。

提出の期限と場所はガイダンスにて指定された通り。本館 1 階 158 号室 (柴田研学生室) の入口の扉に専用ポストが有る。レポートと参考資料を入れ、提出者名と日付を提出簿に記録する。

A 放射能

A.1 放射能に関わる単位

表 3: 放射能に関わる単位

放射能 ... 単位時間当たりの崩壊数		
ベクレル	Bq	1 Bq = 1 count/sec
キュリー (旧単位)	Ci	$1\ \mathrm{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\ \mathrm{Bq}$
吸収線量 ... 単位重量当たりの物質に吸収されるエネルギー		
グレイ	Gy	1 Gy = 1 J/kg
ラド (旧単位)	rad	1 rad = 0.01 Gy
線量当量 or 等価線量 ... 放射線種ごとの生体組織を損傷させる能力を加味した吸収線量		
シーベルト	Sv	[Sv] = $W_R\times$ [Gy], W_R: 放射線荷重係数
レム (旧単位)	rem	1 rem = 0.01 Sv
実効線量 ... 人体組織ごとの放射線耐性を加味した線量当量		
シーベルト	Sv	= $W_T\times$ 線量当量, W_T: 組織荷重係数

- 1 Ci は、ラジウム 1 g の放射能で定義されている。

表 4: 放射線荷重係数 W_R [1]

放射線種	エネルギー	係数
光子	Any	1
電子, ミューオン	Any	1
中性子	<10 keV	5
中性子	10–100 keV	10
中性子	100–2000 keV	20
中性子	2–20 MeV	10
中性子	>20 MeV	5
陽子	>20 MeV	5
α 線等の重粒子	Any	20

表 5: 組織荷重係数 W_T [1]

人体組織	係数
生殖腺	0.20
赤色骨髄, 結腸, 肺, 胃	0.12
乳房, 肝臓, 食道, 甲状腺, 膀胱	0.05
皮膚, 骨表面	0.01
残りの組織	0.05

A.2 放射線の透過と吸収

放射線の典型的な透過能力は図 18 及び表 6 に示す通り。様々な物質中 (混合物含む) での荷電粒子 (α 線 & β 線) の飛程 (stopping range) と γ 線の吸収長 (attenuation length) は、文献 [2] と [3] でより精密に計算できる。

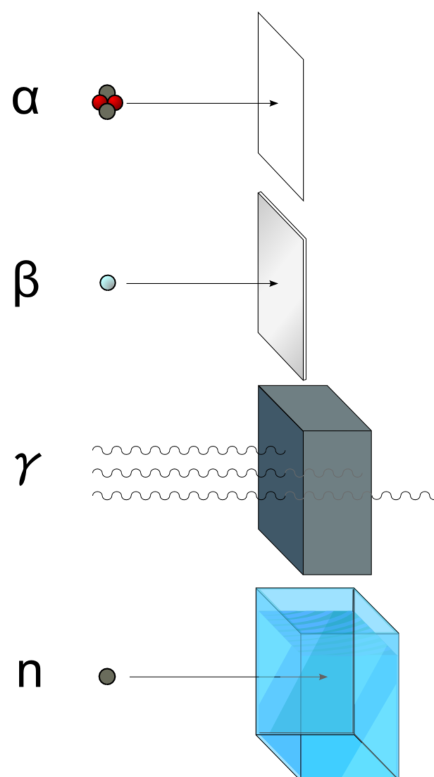


図 18: 放射線の典型的な透過能力 [4]。

表 6: 放射線の典型的な透過能力。

放射線種	紙 1 枚	アルミ板 数 mm	鉛 10 cm	水・コンクリート	空気
α	止	止	止	止	数 mm で止
β	通	止	止	止	数 cm で止
γ	通	通	止	通	通
中性子	通	通	通	止	通

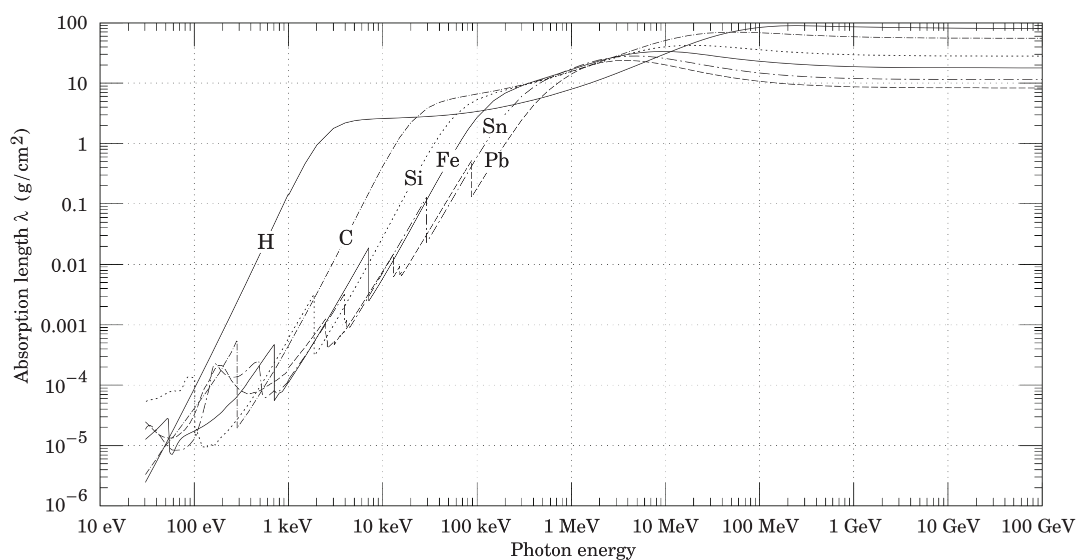


図 19: 光子の減衰長 λ [5]。

表 7: 代表的な物質の比重 ρ と減衰長 λ/ρ。但し、減衰長 λ/ρ は $\lambda = 20$ (g/cm^2) を用いた値であり、エネルギーが 1 MeV 程度の γ 線に対する値である。これより低いエネルギーでは、減衰長が小さくなるので γ 線は早く減衰する。

物質	空気	水	Al	Pb
比重 ρ (g/cm^3)	1.3×10^{-3}	1.0	2.7	11.3
減衰長 λ/ρ (cm)	15000	20	7.4	1.8

表 8: 物質量 (厚さ) と γ 線減衰度の関係。

物質量 t (λ/ρ 単位)	1	2	3	4	10
減衰度 $\exp(-t \cdot \rho/\lambda)$	0.37	0.14	0.050	0.018	4.5×10^{-5}

B 放射線被曝とその影響

B.1 自然放射線による恒常的被曝

表 9: 自然放射線による被曝量 [1]。合計の平均値は 2.4 mSv/year であるが、地域による違いが 1–10 mSv/year と大きい事に注意。

表１　自然放射線源による被ばくの
年間実効線量（世界平均）

被ばく源	年実効線量(mSv)	
	平均値	典型的範囲
宇宙放射線		
直接電離及び光子成分	0.28(0.30)[a]	
中性子成分	0.10(0.08)	
宇宙線生成放射性核種	0.01(0.01)	
宇宙線と生成核種の合計	0.39	0.3–1.0[b]
外部大地放射線		
屋外	0.07(0.07)	
屋内	0.41(0.39)	
屋外と屋内の合計	0.48	0.3–0.6[c]
吸入被ばく		
ウラン及びトリウム系列	0.006(0.01)	
ラドン(^{222}Rn)	1.15(1.2)	
トロン(^{220}Rn)	0.10(0.07)	
吸入被ばくの合計	1.26	0.2–10[d]
食品摂取被ばく		
^{40}K	0.17(0.17)	
ウラン及びトリウム系列	0.12(0.06)	
摂取被ばくの合計	0.29	0.2–0.8[e]
合計	2.4	1–10

a. かっこ内は、以前の評価結果
b. 海面高度から標高の高い地域までの範囲
c. 土壌と建材の放射性核種の成分構成に依存する
d. ラドンガスの屋内濃度に依存する
e. 食品と飲料水の放射性核種の成分構成に依存する

[出典]原子放射線の影響に関する国連科学委員会(編)、放射線医学総合研究所(監訳)：放射線の線源と影響、原子放射線の影響に関する国連科学委員会の総会に対する2000年報告書、附属書B、実業公報社(2002年3月)、p.165

B.2 外部被曝 vs 内部被曝

核種ごとの透過能力の違いにより (図 18 及び表 6 を参照)、被曝は表 10 の様に外部被曝と内部被曝に大別される。

表 10: 外部被曝 vs 内部被曝。

外部被曝	主な寄与は γ 線 (発生源から離れれば α 線や β 線は届かない)
	発生源からの距離 r について $1/r^2$ で強度が下がる (点状線源の場合)
	物質による遮蔽が可能
	中性子が放出される環境 (臨界物質の近傍等) では中性子被曝が深刻
内部被曝	主な寄与は α 線と β 線 (γ 線は透過して体外へ出る)
	発生源 (放射性物質) の除去は不可能
	遮蔽は不可能 (むしろ体外への放出を遮蔽して全部吸収している)

B.3 確定的影響 vs 確率的影響

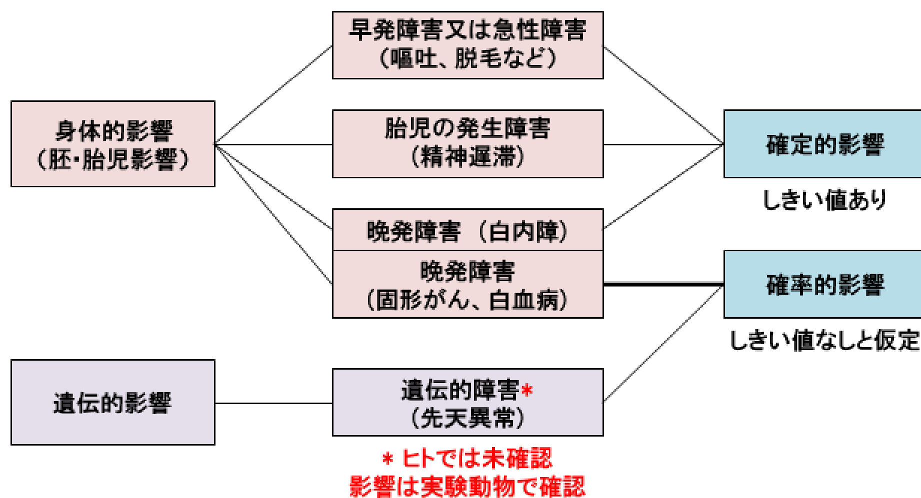


図 20: 放射線の確定的・確率的影響 [4]。

表 11: 短時間で全身に被曝した場合の被曝量と確定的影響の関係 [6]。

線量当量 (Sv)	確定的影響
< 0.25	症状無し
0.25	一時的な白血球の減少
0.5	一時的なリンパ球の減少
1	急性放射線障害。悪心 (吐き気)、嘔吐等。水晶体混濁
2	出血・脱毛等。5%の人が死亡
4	50%の人が死亡
> 7	99%の人が死亡

国際放射線防護委員会 (ICRP, International Commission on Radiological Protection) の 1990 年の勧告によると、被曝線量と発癌の確率は比例関係にあり、その係数は約 5%/Sv である (詳細は表 12 を参照)。つまり、1 mSv で 0.005%、1 Sv で 5%、5 Sv で 25% (但し確定的影響は必ず発現する) となる。200 mSv 以上の線量については比例関係が実証されているが、それ以下の線量については明らかでない。閾値無し (Linear Non-Threshold, LNT) 仮説とは、比例関係が 0 Sv まで成り立つという仮定であり、閾値有り (Liear Threshold, LT) 仮説とは、ある線量以下では比例関係が破れて発癌の確率が 0 になるという仮定である。

表 12: 短時間で全身に被曝した場合の被曝量と確率的影響の関係。被曝量 E (Sv) での各項目の発現確率は AE (%) となる。

ICRP 2007 年勧告 (Pub. 103) [7]			ICRP 1990 年勧告 (Pub. 60) [8]		
	名目リスク係数 A (%/Sv)			名目リスク係数 A (%/Sv)	
	対 全集団	対 成人		対 全集団	対 成人
癌	5.5	4.1	致死癌	5.0	4.0
			非致死癌	1.0	0.8
遺伝的影響	0.2	0.1	遺伝的影響	1.3	0.3
合計	5.7	4.2	遺伝的影響	7.3	5.6

Comparison of Risks

ACTIVITY	DAYS LOST
Being an unmarried male	3500
Cigarette smoking (1 pack/day)	2250
Being an unmarried female	1600
Working as a coal miner	1100
Being 25% overweight	777
Consuming alcohol (US average)	365
Being a construction worker	227
Driving a motor vehicle	207
All industry	60
Exposure to 100 mrem/year for 70 years	**10**
Drinking coffee	6

Fermilab

New Employee Orientation

Comparison of Risks

RELATIVE RISK OF 1 IN A MILLION CHANCES OF DYING

ACTIVITY	CAUSE OF DEATH
Smoking 1.4 cigarettes	Lung cancer
Eating 40 tbsp. of peanut butter	Cancer
Eating 100 charcoal broiled steaks	Cancer
Spending 2 days in New York City	Air pollution
Driving 40 miles in a car	Accident
Flying 2500 miles in a jet	Accident
Canoeing for 6 minutes	Drowning
Receiving 10 mrem of radiation	**Cancer**

Fermilab

New Employee Orientation

図 21: 放射線被曝と日常的行為の危険度の比較 [9]。100 mrem = 1 mSv。**上**: 各行為によって寿命が平均でどれだけ短くなるか。**下**: 100 万分の 1 の確率で死因となってしまう行為。

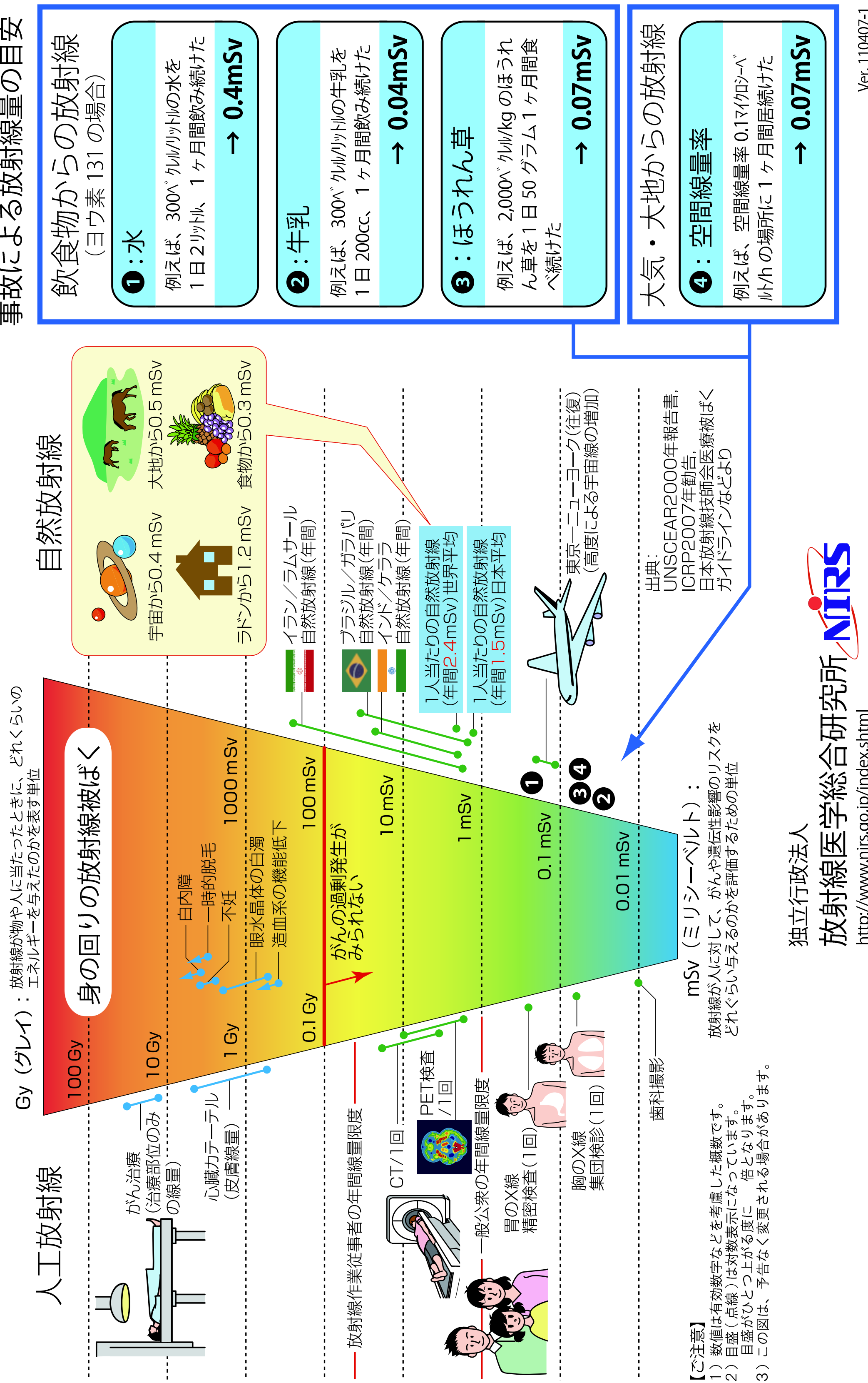


図 22: 日常的行為による放射線被曝 [10]。

B.4 被曝許容量とその決定基準

表 13: 日本の法定 被曝限度 [11]。ICRP の勧告に基づいている。妊娠可能又は妊娠中の放射線業務従事者に対してはより詳細な限度が設けられている。

	5 年間の平均被曝線量	1 年間の被曝線量
放射線業務従事者	20 mSv/year	50 mSv
一般公衆	1 mSv/year	1 mSv (但し例外は有り得る)

B.4.1 放射線業務従事者

放射線被曝の確率的影響に閾値が存在するならば、各個人の被曝量をその閾値以下に抑えれば被害をゼロにできる。しかし現存するデータでは閾値の存在を立証できていない。従って安全の為に、閾値無し仮説の元で現在の被曝許容量は決定されている。

閾値が無いならば被爆量が微小であっても低確率ながら被害が発生する事になる。母集団が大きくなれば低確率な被害でも無視できない。しかし放射線を用いる事で享受できる利益は近代産業において不可欠なので、受容可能な被害の程度を定めて、利益と被害のバランスをとるという方針になっている。

$$ALARA = As\ Low\ As\ Reasonably\ Achievable$$

ICRP1990 年勧告では、被曝許容量の決定に際して年齢別死亡率を指標にしている。年齢別死亡率とは、生命保険を算出する際に用いられるハザード率と同じであり、ある年齢まで生存してその年齢にある一年の間に死亡する確率である。表 14 は種々の年齢と年線量について計算した結果であり、65 歳以下で 10^{-3} 以下となる被曝量として被曝許容量 20 mSv/year (生涯線量は 1 Sv) が決定された。

詳細は [11] を参照。更に ICRP2009 年勧告 (Pub. 111) [12, 13] では近年のデータも判断に含まれている。

B.4.2 一般公衆

放射線業務従事者への制限と同様に年齢別死亡率を用いた評価も行えるが、一般公衆への被曝許容量は、自然放射線による被曝 (平均 2.4 mSv/year) と同程度となる様に決定されている。自然放射線による被曝は地域によって数 mSv の差が有るが、発癌の確率と自然放射能の強度の相関は認められていない。つまり数 mSv/year 程度の被曝のリスクは、他の発癌リスクよりも小さい。

表 14: 被曝による年齢別の死亡率 [11]。モデルを仮定した計算値である事に注意。

表２　各年齢、年線量毎の年齢別死亡率（百万人あたり）に関する1977年勧告と1990年勧告の比較

年線量 (mSv)	年齢（歳） 30	40	50	60	65	70	75
作業者							
50	42	190	570	1,500	2,200	3,200	4,700
30	25	100	340	880	1,300	2,000	2,800
20	17	75	230	590	890	1,300	1,900
15	13	55	170	440	650	1,000	1,400
10	8	37	114	295	445	650	930
50(1977)	625	625	625	625	625	625	625
公衆							
5	4	20	60	150	220	320	470
3	2	12	35	90	130	200	280
2	2	8	24	60	90	130	190
1	1	4	12	30	45	65	95
0.5	0.4	2	6	15	22	32	47
1(1977)	12	12	12	12	12	12	12

注釈：1977年勧告は相加モデル、1990年勧告は相乗モデル（DDREFは２）で計算してある。

〔出典〕ICRP Publication 60 "Recommendation of International Commission on Radiological Protection", (邦訳：日本アイソトープ協会)、附属書C(表C－5)から引用

参考文献

[1] 高度情報科学技術研究機構 (RIST). 原子力百科事典 ATOMICA. http://www.rist.or.jp/atomica/.

[2] NIST (USA). Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions. http://www.nist.gov/pml/data/star/index.cfm.

[3] NIST (USA). Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm.

[4] 文部科学省 環境防災ネット. 原子力防災基本用語集. http://www.bousai.ne.jp/vis/bousai_kensyu/glossary/.

[5] Particle Data Group (PDG). The Review of Particle Physics. http://pdg.lbl.gov/.

[6] Wikipedia. 被曝. http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%A2%AB%E6%9B%9D.

[7] ICRP. Publication 103. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103 (Free Summary Download).

[8] ICRP. Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2060.

[9] Fermi National Accelerator Lab, IL, USA. New Employee Orientation.

[10] 放射線医学総合研究所 (NIRS). 放射線被ばく早見図. http://www.nirs.go.jp/data/pdf/hayamizu0407-hi.pdf.

[11] 高度情報科学技術研究機構 (RIST). 原子力百科事典 ATOMICA, ICRP 勧告 (1990 年) による個人の線量限度の考え. http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-04-01-08.

[12] ICRP. Publication 111. Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas After a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. http://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20111 (Free Download).

[13] 日本アイソトープ協会 (JRIA). ICRP Publication 111 日本語版ドラフト. http://www.jrias.or.jp/index.cfm/6,15092,76,html.